



УДК 621.313.33

### 1.3. ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО ЧИСЛА ПОЛЮСОВ ТЯГОВЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТРЕБОВАНИЯХ К ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИВОДА

### THE CHOICE OF POLES RATIONAL NUMBER OF THE TRACTION INDUCTION MOTORS UNDER DIFFERENT ENERGY EFFICIENCY REQUIREMENTS FOR THE DRIVE

**Кобелев Андрей Степанович**, канд. техн. наук, начальник расчетно-теоретического сектора ПАО «Научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения», Россия, 600009, г. Владимир, ул. Электрозаводская, 1. E-mail: a.kobelev@ruselprom.ru. Тел.: +79107717903

**Andrey S. Kobelev**, Cand. Sc., Head of computational and theoretical sector, OJSC «Scientific Research and Design Institute of Technology Electrical Engineering» NIPTIEM, 600009, Electrozavodskaya street, 1, Vladimir, Russia. E-mail: a.kobelev@ruselprom.ru. Ph.: ++79107717903

**Аннотация:** Выполнен сопоставительный анализ электромеханических характеристик тяговых асинхронных двигателей с различным числом полюсов при различных фиксированных превышениях температуры обмотки статора. Предложены критерии, формирующие множество Парето-оптимальных решений. Представлен метод выбора наилучшего решения из совокупности Парето-эффективных альтернатив. Установлена низкая эффективность «бубликообразной» конструкции с большим числом пар полюсов.

**Abstract:** The report made a comparative analysis of the electromechanical characteristics of traction induction motors with different numbers of poles at various fixed overtemperature of the stator winding. The criteria that form the set Pareto-optimal solutions are proposed. The method of choosing the best solutions from the set of Pareto-efficient alternatives is described. There is a low efficiency of "donut-shaped" design with a large number of pole pairs is founded.

**Ключевые слова:** асинхронные машины; тяговые двигатели; проектирование; оптимизация.

**Key words:** induction machines; traction motors; design; optimization.

Политика РФ в области импортозамещения электромашиностроительных изделий подразумевает, в частности, ускоренное внедрение отечественных тяговых асинхронных двигателей (ТАЭД) для нужд гибридных и чисто электротранспортных средств. Одним из существенных вопросов при разработке ТАЭД является выбор базовой машины с оптимальным, для конкретного применения, числом полюсов.

В работе [1] отмечается, что задача выбора рационального числа полюсов тяговых ТАЭД многофакторна; у специалистов нет единой позиции по назначению данного параметра. Нами рассматривается классическая двухзонная тяговая характеристика  $M=f(N)$ . Точка с индексом «ch» перехода от  $M=\text{const}$  к  $P=\text{const}$  названа квазиноминальной. Поиск наилучшего числа полюсов на множестве альтернатив предложено вести при фиксированном превышении температуры обмотки статора  $\Theta_{cu\_ch}$  в квазиноминальной точке характеристики для любого из вариантов.

В [1] построено множество Парето существенных критериев для вариантов ТАЭД  $P_{ch}=110$  кВт,  $N_{ch}=1500$  об/мин, IC411, при  $2p=4, 6, 8, 12, 18$ . При этом  $\Theta_{cu\_ch} \approx 90$  °С. Относительная длина второй зоны 3,5, кратность максимального момента в конце второй зоны  $K_{m\_II} \approx 1,3$ . Принято  $U_{\text{max}\Phi}=320$  В. Принято: закон регулирования параметров питания в каждой из зон должен обеспечивать  $I_{\text{min}}$ . Увеличение потерь из-за несинусоидальности питающего напряжения, подаваемого ПЧ, учитывалось увеличением расчетного превышения температуры на 7 %. В продолжение исследования выполним аналогичный расчет и при  $\Theta_{cu\_ch} \approx 130$  °С, т.е. оценим двигатели при разных требованиях к энергоэффективности привода. Действительно, для ряда гибридных транспортных средств (тягачи, тракторы) важно обеспечить наибольший рабочий момент, и значимость КПД является доминирующей. Для электромобилей более важным параметром является минимизация массы

и/или объема ТАЭД, даже в ущерб снижению КПД.

Другим важным вопросом исследования является разработка метода выбора наилучшего варианта из множества Парето-эффективных решений. Отберем следующие критерии оценки вариантов:

- масса  $G_{act}$  активных частей ТАЭД;
- объем активных частей  $V_{act} = D_{as}^2 \cdot L_s$ ;
- себестоимость активных частей  $C_{act}$ , в которой, в частности, учтено различие цены на стали марок 2212 и 2412 и систем изоляции классов F и H;
- норма по КПД  $\eta_{av}$ ;
- норма по току статора  $I_{av}$ .

Норму по КПД  $\eta_{av}$  установим следующим образом:

$$\eta_{av} = 0,125\eta_{Nch-0,25} + 0,15\eta_{Nch-0,5} + 0,15\eta_{Nch-0,75} + 0,15\eta_{Nch-1} + 0,15\eta_{Nch-1,5} + 0,15\eta_{Nch-2} + 0,125\eta_{Nch-3,5} \quad (1)$$

где  $\eta_{Nch-0,25}$  означает КПД в точке тяговой характеристики  $N=0,25N_{ch}$ .

Предложенная норма близка к той, что установлена в стандарте ИЕС 60034-30-2. Аналогично определяются нормы  $I_{av}$  и  $\Theta_{cu\_av}$ .

Агрегированная целевая функция оптимизации:

$$F_{\rightarrow \max}(\mathbf{X}) = \alpha_{Gact} \frac{G_{act_b}}{G_{act_i}} + \alpha_{Vact} \frac{V_{act_b}}{V_{act_i}} + \alpha_{Ca} \frac{Ca_b}{Ca_i} + \alpha_{\eta} \frac{\eta_{av\_b}}{\eta_{av\_i}} + \alpha_I \frac{I_{av\_b}}{I_{av\_i}} \quad (2)$$

Выбор через свертку критериев всегда окрашен субъективизмом ЛПР, поскольку подразумевает введение коэффициентов значимости критериев  $\alpha$ . Минимизация субъективизма достигается, в том числе, введением нескольких «взглядов» на конечные цели оптимизации. В данной работе рассмотрим два взгляда:

- 1) Оптимизация ТАЭД на максимум КПД, при этом  $\alpha_{\eta} = 0,5$ ; остальные значимости  $\alpha_i = 0,125$ ;
- 2) Оптимизация ТАЭД на минимум  $G_{act}$ , при этом  $\alpha_{Gact} = 0,5$ ; остальные значимости  $\alpha_i = 0,125$ .

Важно отметить, что в данной работе мы оцениваем разные структурно-параметрические варианты, подразумевая под изменением структуры изменение числа полюсов. Каждый вариант, помещенный для оценки в табл. 1, 2 был предварительно оптимизирован на принципах [2].

Существенным является вопрос, можно ли выражения, подобные (1), использовать напрямую, как например, это сделано в [3], или же требуется приведение критериев к сопоставимой мере (речь здесь идет не о значимостях, а о самих критериях!). По нашему мнению, указанное приведение для рассматриваемой задачи

обязательно. Действительно, если этого не сделать, то, например, повышение КПД с 92 % до 94 % и снижение массы с 94 кг до 92 кг является идентичным результатом, что абсурдно.

Для соизмеримости критериев установим шкалы их допустимых значений.

- a) Шкала КПД:  $(IE1 + 20\% \cdot \Delta P_{IE1}) \div IE4$ . Значение класса энергоэффективности берется для ближайшего общепромышленного ( $P_H=110$  кВт,  $N_0=1500$  об/мин) двигателя «SER». Базовым среди вариантов 1÷17 принят двигатель ближайший к общепромышленному, поз. 1, «BASE».
- b) Шкала  $G_{act}$ :  $(1,5 G_{act\_SER}) \div (0,25 G_{act\_SER})$ .
- c) Шкала  $V_{act}$ :  $(1,5 V_{act\_SER}) \div (0,25 V_{act\_SER})$ .
- d) Шкала  $C_{act}$ :  $(2 V_{act\_SER}) \div (0,333 V_{act\_SER})$ .
- e) Шкала  $I_{av}$ :  $(3 I_{av\_BASE}) \div (0,5 I_{av\_BASE})$ .

Всего представлено 17 вариантов расчета. Варианты 4, 17 являются доминируемыми и могут быть исключены. В таблице 2 показатель  $T_{yp}$  определяется по (2) с учетом введенных шкал; показатель  $\Sigma_{бал}$  показывает в о.е., насколько он уступает идеальному варианту.

На основе представленных в таблицах 1, 2 и рисунках 1÷5 данных можно сделать **следующие выводы:**

- ТАЭД с  $2p > 12$  не эффективны при любом из двух «взглядов» на оптимизацию. То, что для  $2p > 12$  отсутствует даже эффект минимизации  $G_{act}$ , является весомым контраргументом сторонникам «бублико-образной» конструкции;
- максимизация КПД достигается для  $2p=6$ ;
- минимизация массы для  $2p=8, 12$ ;
- анализ поведения графиков  $P_i=f(2p)$  свидетельствует, что действительно, снижение энергоэффективности определяется почти исключительно увеличением  $P_{cu}$ . Это позволяет сделать опосредованный вывод об эффективности охлаждения в ТАЭД систем теплоотвода, интенсивно воздействующих на обмотку для малополусных машин, и интенсивно воздействующих на сердечник для многополусных машин.
- несмотря на укорочение активной длины  $L_s$  потери в стали  $P_{fe}$  для  $\Theta_{cu\_ch}=90, 130$  °C и одной марки электротехнической стали примерно равны;
- потери в роторе в точке «ch» снижаются только до  $2p=12$ , поскольку из-за требования  $K_{m\_He} \approx 1,3$  вынуждают сдвигать зону с  $U_{max\Phi}=320$  В вправо от «ch».

В ближайшей перспективе данные исследования будут развиты для ТАЭД с различными способами охлаждения и различной протяженностью тяговых характеристик.

Таблица 1.

Основные электромеханические свойства сопоставляемых электродвигателей

№	$2p$	$T_{\Theta_{cu}}$	Сталь	$\eta_{av}$	$\Theta_{cu_{av}}$	$L_S$	$L_{\Sigma}$	$V_{act}$	$G_{act}$	$C_{act}$	$B_{\delta_{ch}}$	$B_{ZS_{ch}}$	$U_{\phi_{ch}}$	$K_{m_{IIe}}$
вар	—	—	—	%	°C	мм	мм	дм <sup>3</sup>	кг	о.е.	Тл	Тл	В	—
1	4	S	2212	94,3	80,3	260	475	62,4	320,2	114,1	0,8	1,694	320	1,36
2	4	ML	2212	93,3	109,5	208	423	<b>49,9</b>	264,5	107,3	0,879	1,851	303	1,36
3	4	S	2412	94,4	82,2	260	475	62,4	317,2	124,9	0,8	1,694	320	1,35
4←2	4	<del>ML</del>	<del>2412</del>	<del>93,3</del>	<del>113,2</del>	<del>214</del>	<del>429</del>	<del>51,4</del>	<del>268,3</del>	<del>118,0</del>	<del>0,847</del>	<del>1,787</del>	<del>301</del>	<del>1,33</del>
5	6	S	2212	94,8	72,2	310	520	74,4	336,8	120,6	0,773	1,634	320	1,62
6	6	ML	2212	94,0	106,4	228	438	54,7	256,4	103,0	0,85	1,79	320	1,36
7 $\eta \uparrow!$	6	S	2412	<b>95,0</b>	77,7	270	480	64,8	295,5	120,2	0,794	1,679	320	1,46
8	6	ML	2412	94,1	108,1	220	430	52,8	246,0	109,6	0,817	1,73	299	1,4
9	8	S	2212	94,3	<b>69,0</b>	310	503	74,4	323,8	114,2	0,767	1,579	320	1,32
10	8	ML	2212	93,5	100,6	214	407	51,4	230,9	90,4	0,863	1,769	294	1,32
11	8	S	2412	94,8	69,3	260	453	62,4	273,4	109,9	0,814	1,671	310	1,31
12 $G \downarrow!$	8	ML	2412	93,9	102,5	193	386	46,3	<b>209,7</b>	<b>93,6</b>	0,836	1,723	272	1,31
13	12	S	2412	94,1	70,5	310	494	74,4	279,9	121,3	0,7	1,442	278	1,2
14	12	ML	2412	93,6	100,5	211	395	50,7	197,9	94,5	0,812	1,63	249	1,32
15	18	S	2412	93,3	82,1	325	505	78	255,7	128,8	0,583	1,349	227	1,25
16	18	ML	2412	93,0	100,2	253	433	60,8	203,7	110,2	0,618	1,424	205	1,37
17←16	24	<del>ML</del>	<del>2412</del>	<del>92,1</del>	<del>103</del>	<del>342</del>	<del>502</del>	<del>82,1</del>	<del>274,7</del>	<del>140,4</del>	<del>0,58</del>	<del>1,123</del>	<del>178</del>	<del>1,42</del>

Таблица 2.

Значения токов, потерь и технического уровня исследуемых электродвигателей

№	$I_{av}$	$I_{Ib}$	$I_{ch}$	$I_{IIe}$	$I_{or_{ch}}$	$P_{cu}$	$P_{al}$	$P_{fe}$	$P_{heat}$	$P_{cu}/P_{fe}$	$K_0$	«Взгляд $\eta$ »		«Взгляд $G$ »	
												$\Sigma_{бал}$	$T_{yp}$	$\Sigma_{бал}$	$T_{yp}$
вар	А	А	А	А	А	Вт	Вт	Вт	Вт	—	—	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.
1	<b>128,5</b>	128,9	131,1	137,3	41,1	1983	1181	1112	3521	1,67	0,273	0,551	1,000	0,518	1,000
2	137,6	146,5	143,05	137,8	52,5	2703	1430	1204	4486	2,07	0,24	0,472	0,869	0,575	1,142
3	130,9	133,8	133,2	137,2	47,9	2046	1152	651	3270	2,93	0,179	0,556	1,011	0,516	1,001
4	138,9	149,7	144,55	138,2	54,8	2788	1484	632	4237	4,08	0,138	0,461	0,849	0,561	1,115
5	138,1	143,1	143,3	135,1	68,3	1405	670	2110	3163	0,65	0,509	0,578	1,041	0,486	0,927
6	139,9	148,0	143,9	139,9	67,3	2055	909	1967	3938	0,99	0,412	0,547	1,005	0,598	1,186
7	139,3	148,1	143,8	136,9	69,9	1621	753	1049	2790	1,51	0,311	<b>0,625</b>	<b>1,142</b>	0,555	1,081
8	145,3	158,6	153,2	138,4	71,1	2295	1030	947	3600	2,36	0,277	0,560	1,038	0,608	1,214
9	149,5	157,2	156,3	145,6	86,6	1496	601	2762	3593	0,54	0,571	0,523	0,942	0,487	0,935
10	158,1	175,1	169,15	146,1	90,1	2252	808	2581	4398	0,86	0,462	0,505	0,935	0,621	1,244
11	153,7	167,7	162,6	145,3	92,5	1725	644	1346	2995	1,26	0,366	<b>0,616</b>	<b>1,132</b>	0,580	1,143
12	164,3	187,5	179,5	145,7	90,5	2529	973	1114	3897	2,21	0,246	0,562	1,051	<b>0,661</b>	<b>1,335</b>
13	191,4	215,3	210,7	163,6	136,4	1716	624	2311	3555	0,734	0,5	0,492	0,900	0,512	1,012
14	207,7	243,1	234,8	159,8	147,4	2307	805	2006	4084	1,14	0,394	0,506	0,955	<b>0,642</b>	<b>1,312</b>
15	265,1	308,2	300,5	188,2	206,9	2155	691	2617	4228	0,814	0,482	0,367	0,685	0,478	0,976
16	280,4	332,3	321,7	187,8	209,5	2502	852	2305	4536	1,04	0,417	0,380	0,731	0,563	1,174
17	442,0	517,0	506,9	276,0	370,2	2436	919	3401	5247	0,679	0,518	0,133	0,287	0,336	0,744

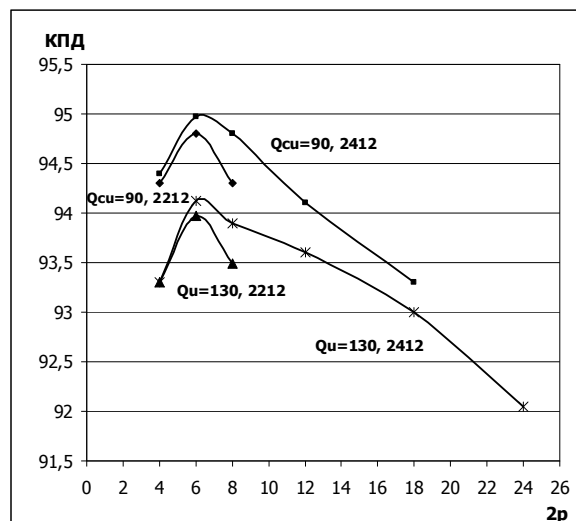


Рис. 1. Зависимость  $\text{КПД}=f(2p)$

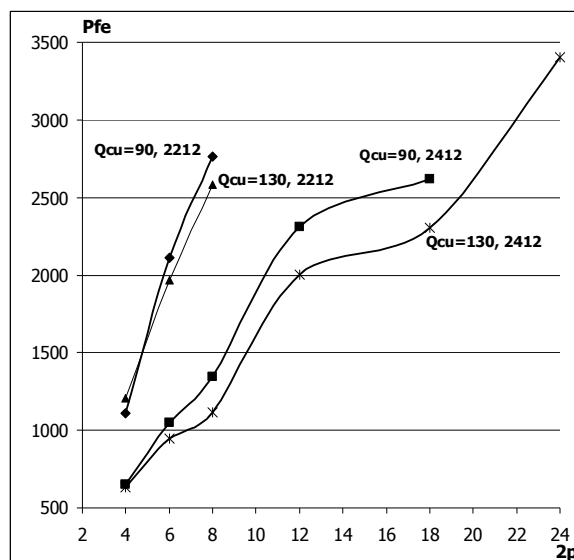


Рис. 4. Зависимость  $P_{fe}=f(2p)$

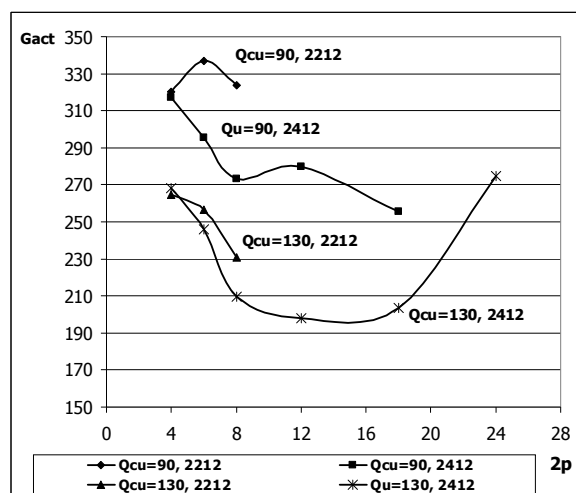


Рис. 2. Зависимость  $G_{act}=f(2p)$

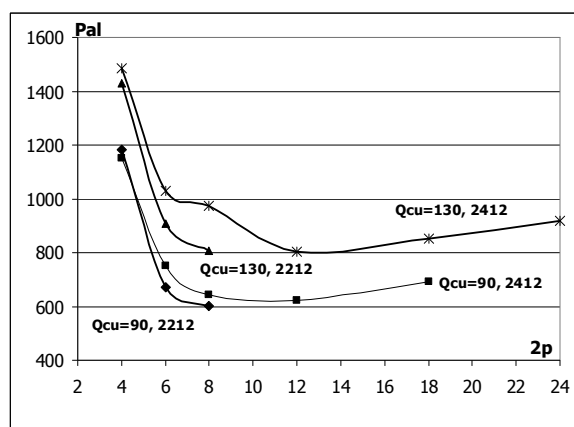


Рис. 4. Зависимость  $P_{al}=f(2p)$

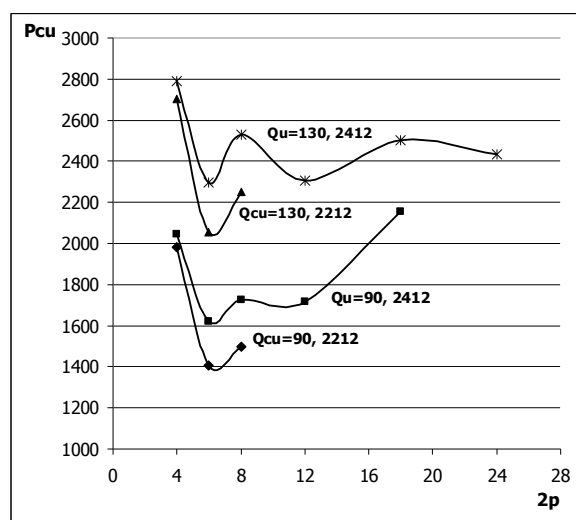


Рис. 3. Зависимость  $P_{cu}=f(2p)$

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.С. Кобелев. Выбор рационального числа полюсов тяговых асинхронных двигателей при условии постоянства температуры обмотки статора в квазиноминальной точке тяговой характеристики // Материалы XVIII Междунар. научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии». Иваново. 2015. Том 3. С. 120–124.
2. Кобелев А.С. Применение кластерного анализа в многопоточном проектировании активных частей асинхронных электродвигателей // Электротехника. – 2015. № 3. С. 8–15.
3. Е.М. Лопухина, Г.А. Семенчуков. Проектирование асинхронных микродвигателей с применением ЭВМ. М.: Высшая школа, 1980. 360 с.